

УДК 658.5.012.1

М. В. Рашковец^{1*}, Н. Г. Кислов²¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург**mrashkovets@mail.ru*Научные руководители: канд. техн. наук, доц. А. А. Никулина¹, канд. техн. наук,
доц. О. Г. Климова-Корсмик²

МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПРЯМЫМ ЛАЗЕРНЫМ ВЫРАЩИВАНИЕМ

Рассмотрены режимы высокоскоростного прямого лазерного выращивания и структура жаропрочного никелевого сплава ЭИ698П, сформированная при оптимальных технологических параметрах. Оценены механические свойства, проведено сравнение с механическими свойствами аналогичного материала, полученного по традиционной технологии.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, аддитивные технологии, микроструктура, механические свойства

M. V. Rashkovets, N. G. Kislov

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NICKEL-BASE ALLOY OBTAINED BY HIGH-SPEED DIRECT LASER DEPOSITION

The operating parameters of High-speed direct laser deposition and the structure of nickel-base alloy EI698P obtained with optimal operating parameters are presented. The mechanical properties were evaluated with a comparison of the mechanical properties of a similar material obtained by conventional processing.

Key words: Ni-base alloys, additive manufacturing, microstructure, mechanical properties

Высокоскоростное прямое лазерное выращивание — это технология аддитивного производства, основанная на подаче металли-

ческих материалов в виде порошка в расплавленную ванну при лазерном плавлении для производства изделий с высокими механическими свойствами [1]. Использование лазерного источника тепла позволяет изготавливать крупногабаритные детали сложной геометрии, а прямой подвод энергии — при необходимости формировать градиентную структуру.

Высокие механические свойства и способность длительно работать при температуре 550–700 °С позволяют применять жаропрочный никелевый сплав ЭИ698 П (71,034–78,46Ni, 13–16Cr, 2,8–3,2Mo, 2,35–2,75Ti, 1,9–2,2Nb ≥ 2Fe, 1,45–1,8Al, 0,03–0,07C % вес.) для изготовления жаропрочных изделий ответственного назначения [2]. Уровень механических свойств и жаропрочных характеристик, необходимых для обеспечения стабильной работы деталей газовой турбины при формировании изделий стандартными литейными технологиями, достигается термической обработкой [2]. Учитывая наличие повторного термического влияния при формировании изделий аддитивным методом, были проанализированы микроструктура и механические свойства жаропрочного никелевого сплава ЭИ698П без применения дополнительной термической обработки после формирования образцов.

При выборе оптимального режима были проведены предварительные эксперименты с варьированием мощности лазерного излучения от 1400 до 2000 Вт, шага по высоте отдельного слоя от 0,6 до 0,9 мм при комбинации скорости сканирования 25 и 35 мм/с. При минимальных указанных рабочих параметрах в образцах образуется большое количество пор и несплавлений. При средних значениях из-за большого объема расплавленной ванны металла меняется высота выращенных слоев по краям образца, что может привести к искажению формы изделия. Таким образом, исследованию подвергались образцы, полученные при скорости лазерного сканирования 35 мм/с, мощности лазерного излучения 2000 Вт и с шагом по высоте 0,9 мм.

В микроструктуре образцов отсутствуют трещины. Продольное сечение представлено дендритным строением (рис. а, б). Рост дендритного зерна направлен перпендикулярно подложке, имеет эпитексиальный характер и распространяется в пределах 10–15 последовательных слоев. В структуре не просматривается граница между соседними слоями, которая при эксплуатации может служить концентратором напряжений. Несмотря на высокую скорость охлаждения в структуре присутствуют зоны с равноосной структурой (рис. в). Граница разде-

ла между разнотерменными областями может инициировать образование трещин во время работы изделия [3].



Рис. Микроструктура продольного сечения образца:

а — первые слои выращивания относительно подложки; *б* — средние слои выращивания относительно подложки; *в* — зоны с равновесной структурой

В таблице представлены механические свойства выращенного сплава ЭИ698П без применения дополнительной термической обработки в сравнении с механическими свойствами аналогичного сплава, полученного методом литья с последующей термической обработкой (закалка 1120 °С/8 ч/воздух; отпуск 1000 °С/4 ч/воздух, 750–775 °С, 16–25 ч, воздух), и сплава, полученного спеканием.

Таблица

Механические свойства жаропрочного никелевого сплава ЭИ698П

Технология	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Высокоскоростное прямое лазерное выращивание	1030	840	18
Технология литья + ТО	1150	705	16
Спекание	1250	800	15

Исходя из сравнительной таблицы, можно сделать вывод, что сплав, сформированный аддитивным методом высокоскоростного прямого лазерного выращивания, имеет значения, близкие к свойствам материала, полученного методом спекания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19–31–27001.

Литература

1. Technological foundations of high-speed direct laser deposition of products by the method of heterophase powder metallurgy / G. Turichin [et al.] // Scientific and technical journal «Fotonika», 2015. № 4. P. 68–83.
2. Колачев В. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М. : МИСИС, 1999. 416 с.
3. Справочник по машиностроительным материалам. Т. 1. Сталь / Г. И. Погдин-Алексеев. М. : МАШГИЗ, 1959. 224 с.